

深层页岩射孔条件下原位应力场对水力裂缝起裂和复杂性的影响

刘英君¹, 鲜成钢^{1*}, 梁兴², 张介辉², 李后俊¹, 刘云翼¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油浙江油田公司, 杭州 311100

* 通信作者, xianchenggang@cup.edu.cn

收稿日期: 2024-06-05; 修回日期: 2024-08-16

国家重点研发计划项目(2020YFA0710604)资助

摘要 鉴于非常规各向异性储层水力压裂射孔簇非均匀起裂的科学难题, 本文考虑弱面各向异性, 射孔孔眼与井筒的应力集中效应的叠加, 建立了任意定向井眼与射孔孔眼的应力模型与水力裂缝起裂形态预测的解析模型, 研究了垂直缝、水平缝的起裂条件。对罗布区块产量差异最大的两口井进行力学分析, 研究表明: 射孔孔眼周围的应力分布对裂缝起裂压力有显著影响, 从而影响了井筒附近裂缝的几何形状。在沿最小水平主应力方向布井且主要处于走滑偏正断层应力状态的Y1井中, 未产生气液的主要力学原因是井眼与射孔通道两次应力集中导致近井原位应力场的水平主应力反转, 应力状态变为逆断层, 近井主要为水平缝, 气液运移通道受阻。处于走滑偏正断层应力状态的Y2井中, 两次应力集后应力状态变为走滑偏逆断层, 垂直缝起裂范围占比75%以上, 近井裂缝通道连通性较好, 有助于储层气液的运移。本研究可为水力压裂的射孔优化设计提供参考, 为现场实际应用提供了最小的起裂压力与最佳井筒—油藏连接通道的射孔方向。

关键词 页岩气; 应力集中; 水平主应力反转; 水平缝; 射孔优化

中图分类号: TE377; P618.13

The impact of geomechanics and perforations on hydraulic fracture initiation and complexity in deep shale reservoirs

LIU Yingjun¹, XIAN Chenggang¹, LIANG Xing², ZHANG Jiehui², LI Houjun¹, LIU Yunyi¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 PetroChina Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou 311100, China

Received: 2024-06-05; Revised: 2024-08-16

Abstract In view of the scientific problem of non-uniform initiation of hydraulic fracturing perforation clusters in unconventional anisotropic reservoirs, this paper considers the anisotropy of weak plane and the superposition of stress concentration

引用格式: 刘英君, 鲜成钢, 梁兴, 张介辉, 李后俊, 刘云翼. 深层页岩射孔条件下原位应力场对水力裂缝起裂和复杂性的影响. 石油科学通报, 2025, 10(01): 120-132

LIU Yingjun, XIAN Chenggang, LIANG Xing, ZHANG Jiehui, LI Houjun, LIU Yunyi. The impact of geomechanics and perforations on hydraulic fracture initiation and complexity in deep shale reservoirs. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(01): 120-132. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.03.001

effect of perforation hole and wellbore, and establishes the stress model of arbitrary directional hole and perforation hole and the analytical model of hydraulic fracture initiation morphology prediction. The initiation conditions of vertical and horizontal fractures are studied. The mechanical analysis of two wells with the largest difference in production in Luobu block is carried out. The results show that the stress distribution around the perforation hole has a significant influence on the fracture initiation pressure, which affects the geometry of the fracture near the wellbore. In well Y1, which is arranged along the direction of the minimum horizontal principal stress and is mainly in the stress state of the strike-slip partial normal fault, the main mechanical reason for the absence of gas-liquid is that the two stress concentrations of the borehole and the perforation channel lead to the reversal of the horizontal principal stress of the in-situ stress field near the well, and the stress state becomes reverse fault. The near well is mainly horizontal fracture, and the gas-liquid migration channel is blocked. In the Y2 well, which is in the stress state of the strike-slip normal fault, the stress state becomes a strike-slip reverse fault after two stress sets, and the vertical fracture initiation range accounts for more than 75%. The connectivity of the near-well fracture channel is good, which is helpful for the migration of gas and liquid in the reservoir. This study offers insights for the optimal design of perforation holes in hydraulic fracturing, providing information on the minimum fracture initiation pressure and the optimal perforation direction for the wellbore-reservoir connecting channel in practical field applications.

Keywords shale gas; stress concentration; horizontal principal stress reversal; horizontal fracture; perforation optimization

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.03.001

0 引言

我国页岩气藏普遍埋藏较深,呈现地质构造复杂、高应力、天然裂缝发育和岩石各向异性等典型特征。水力压裂是非常规油气藏主要增产措施^[1-2],但往往井下测量和生产测井表明,射孔簇的产量不均匀,造成这一现象的主要原因是射孔簇起裂不均匀,或者出现不利于生产的水平缝起裂等情况。对页岩储层裂缝起裂的规律认识不清,导致压裂工艺技术针对性不强,严重制约我国页岩气勘探开发效果^[3-6]。裂缝起裂形态预测是页岩气安全钻井、压裂评价和高效生产的关键问题^[7-8]。

页岩通常具有薄页状或薄片状的层理性结构,裂缝发育集中,呈现出较强的非均质性和各向异性(横观各向同性特征)^[9-12],基于各向同性介质推导的井筒应力模型不足以描述实际页岩的行为^[13-14],需要开发更复杂的模型来描述更真实的岩石响应。Lekhnitskii^[15]首次推导出了各向异性弹性的解析解,Amadei^[16]采用了Lekhnitskii的方法,并将其广泛应用于岩石力学工程问题,简称为Lekhnitskii-Amadei井筒应力计算模型。各向异性储层的井筒应力计算模型的广泛应用,对于页岩的裂缝起裂压力预测具有重要意义^[17-21]。Ong^[22]等发现储层裂缝起裂强烈依赖于地层的各向异性。Oliver^[23]等通过三维有限元数值模型对Lekhnitskii-Amadei模型进行了严格的验证,Lekhnitskii-Amadei解是有效的,且不受井眼方向和弹性各向异性对称性的限制。Majed^[24]等提出并对比

了各向同性与各向异性斜井井壁张性破坏的半解析解,表明各向异性对起裂压力的影响与各向异性程度直接相关。

近井裂缝形态主要受轴向应力与环向应力的影响,而远场裂缝形态由三向地应力决定,一般垂直于最小主应力起裂,向最中间主应力方向沿伸^[25-26]。近井起裂存在两种假设条件:一是井筒半径远大于射孔孔眼半径,假设不考虑射孔孔眼的应力集中作用,用井筒应力计算裂缝起裂^[27-28]。二是假设水力射孔井筒是两个不同尺寸的孔眼垂直相交,受到两个相互垂直的主应力的共同作用,根据射孔孔眼基部(井筒于孔眼相交)的应力集中,推导出形成垂直缝(纵向裂缝与横向裂缝)起裂临界压力的表达式^[26, 29-32],判断裂缝的起裂形态。关于射孔段起裂分析,目前研究甚少。Weng^[28, 33-34]等假设 $\theta = \theta_p$, $r = r_p = r_w + l_p$ (井筒半径+射孔长度),基于Kirsch模型计算射孔尖端的射孔壁应力,并推导了射孔尖端起裂压力的解析解。

目前关于水力压裂起裂压力预测研究,主要以Kirsch各向同性模型计算的一次应力集中后的井筒应力开展,考虑井筒与射孔两次应力集中的预测较少。因此,鉴于非常规各向异性储层水力压裂射孔簇非均匀起裂的科学难题,本文考虑弱面各向异性,射孔孔眼与井筒的应力集中效应的叠加,建立了任意定向井眼与射孔孔眼的应力模型与水力裂缝起裂形态预测的解析模型,研究了垂直缝、水平缝的起裂条件。该模型根据地应力条件、井眼与射孔位置,可预测裂缝起裂压力、位置及裂缝形态,对现场压裂射孔方案优化

表1 Y1、Y2 两口井概况

Table 1 Overview of wells Y1 and Y2

类型	Y1	Y2
构造位置	罗布向斜北西翼	罗布向斜南西翼
储层品质	I类储层占比 93.50% 水平段平均有效孔隙度为 3.2%；平均总有机碳 TOC 为 3.7%；平均总含气量为 4.6 m ³ /t	I类储层占比 91.80% 水平段平均孔隙度为 4.0%；平均 TOC 为 4.4%；平均总含气量为 6.0 m ³ /t
垂向应力(有效应力)	39.83~52.14 MPa	28.13~29.29 MPa
最大水平主应力(有效应力)	32.72~59.86 MPa	31.66~43.50 MPa
最小水平主应力(有效应力)	13.29~31.74 MPa	11.68~22.13 MPa
孔隙压力	37.97~46.21 MPa	29.07~30.06 MPa
垂向弹性模量	34.77~54.21 GPa	26.15~52.66 GPa
横向弹性模量	43.02~57.16 GPa	37.77~57.69 GPa
垂向泊松比	0.16~0.25	0.15~0.37
横向泊松比	0.15~0.24	0.15~0.38
最大水平主应力方向	北东—南西向	北西—南东向
水平井布井方位	160°	220°
水平段测深	3810~5093 m	2561~3604 m
水平井靶体	龙一 ₁ ¹ 小层	龙一 ₁ ¹ 、龙一 ₁ ²⁻¹ 小层
主要射孔参数	12 段、3 簇射孔、每簇 0.6 m，孔密 20 孔/m，36 孔/段，相位 60°	14 段、8 簇射孔、每簇 0.6 m，孔密 10 孔/m，42 孔/段，相位 60°(根据避射光纤与天然裂缝微调)
产量	无气液	折日产气量 6.9 × 10 ⁴ m ³ /d

设计给予理论指导。

1 区域概况

Y1、Y2 构造位置为四川台坳川南低陡褶带南缘罗场复向罗布向斜，周围大部分地区为侏罗系自流井组，地层产状较平缓，地层分布稳定，构造平缓，处于建武向斜南翼，为页岩气有利保存区^[35-36]。两口井的概况如表 1 所示，I类储层品质占比 90%以上，且目标箱体钻遇率高。

Q 因子(式 1)通过量化地应力状态，反映了地应力分布和压裂裂缝的起裂和扩展特性。在压裂设计和实施过程中，了解 Q 因子有助于优化压裂参数，提高压裂效果。

Q 因子定义应力状态：划分为①正断层($0 \leq Q \leq 0.75$)、②正断层偏走滑($0.75 \leq Q \leq 1$)、③走滑偏正断层($1 \leq Q \leq 2$)、④走滑偏逆断层($2 \leq Q \leq \infty$)和⑤逆断层($Q \leq 0$)5种类型。

$$Q = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{\sigma_v - \sigma_h} \quad (1)$$

其中： σ_h 为最小水平主应力、 σ_H 为最大水平主应力、

σ_v 为垂向应力(总应力)，MPa。

压裂裂缝通常在最小主应力方向开启，并沿垂直于该方向扩展。在最小水平主应力布井的情况下，处于正断层($0 \leq Q \leq 0.75$)应力状态时，有利于形成垂直裂缝，从而促进储层中气液的运移；正断层偏走滑($0.75 \leq Q \leq 1$)应力状态开始偏向走滑，但正断层特征依然显著；走滑偏正断层($1 \leq Q \leq 2$)应力环境时，裂缝的扩展不在完全垂直，出现水平裂缝，近井裂缝的迂曲度增加；走滑偏逆断层($2 \leq Q \leq \infty$)的情况下，裂缝扩展结合了走滑断层与逆断层应力的特征，导致裂缝沿多个方向扩展。在逆断层($Q \leq 0$)应力状态下，压裂裂缝的开启和扩展通常较为困难，需要施加更高的压裂压力与优化射孔角度，以克服地层的压应力。

如图 1a 所示，Y2 井位于 Y1 井西南部偏西。Y1 井水平段应力状态分布为走滑偏正断层和正断层偏走滑，主要为走滑偏正断层(图 1b)。Y2 井水平段应力状态分布为走滑偏正断层(图 1c)。

大规模压裂后，Y2 折日产气量可达 6.9×10^4 m³/d，但 Y1 未产气液。推测近井地带的连接，井筒和油藏的连接失效，失效的最大可能性就是应力状态发生了不利于裂缝垂直起裂的应力状态。本文对产量差异最

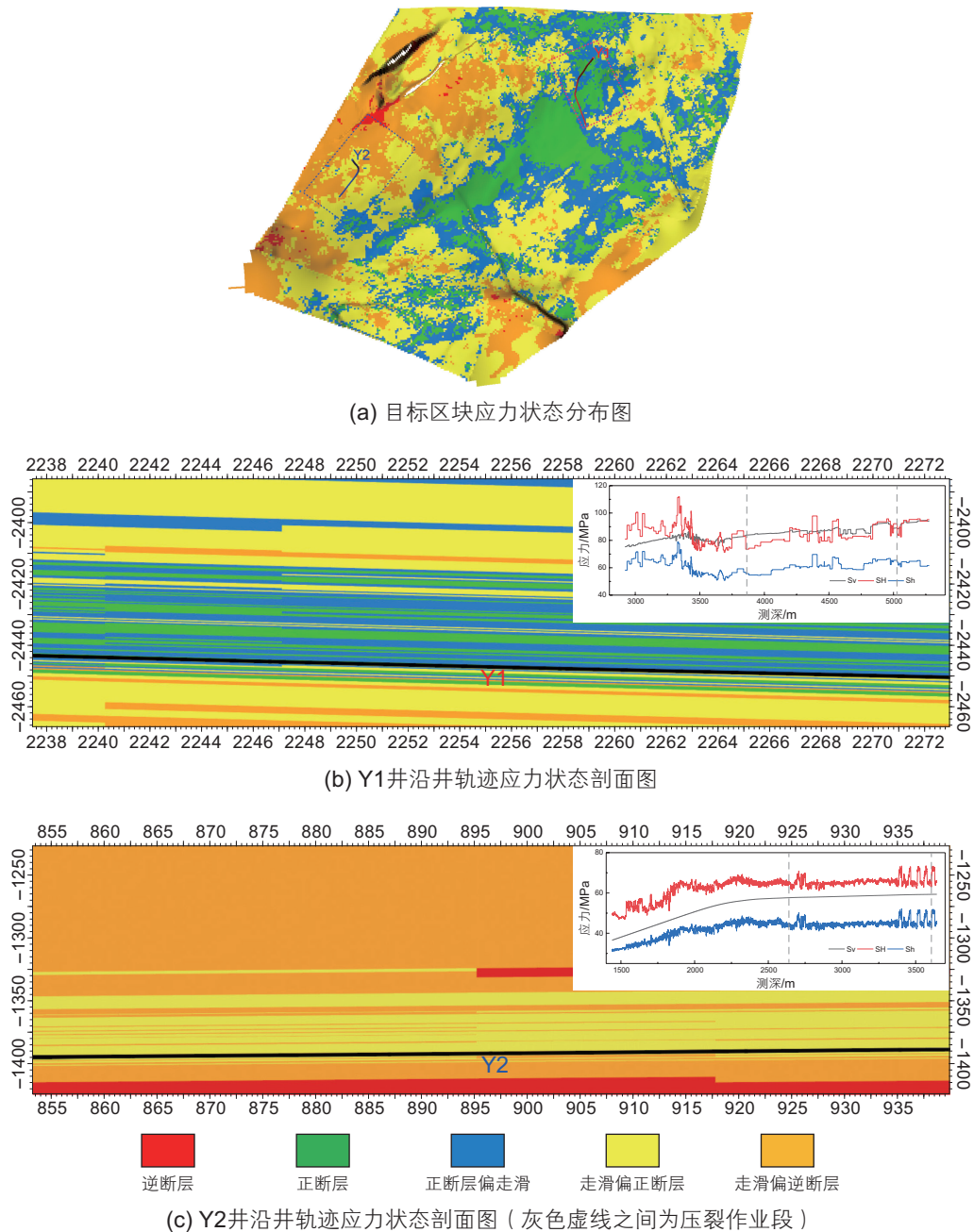


图 1 罗布区块目的层应力状态分布图

Fig. 1 Stress regime distribution of the Luobu block purpose layer

大的两口井力学分析进行论证。

2 各向异性储层水力裂缝起裂模型

该模型基于以下假设：①地层为均匀、连续、一般各向异性的线弹性介质；②忽略塑性、温度、流体及化学效应和时间效应；③裸眼完井，忽略水泥环、套管的力学作用(后续将继续研究水泥环与套管的力学影响)。

2.1 井眼与射孔孔眼的应力模型

针对页岩储层的各向异性特性，如图 2 所示，建立各向异性井眼稳定模型所涉及到的大地参考坐标系、远场应力参考坐标系、井眼参考坐标系以及弱面参考坐标系。根据本构方程、平衡方程、协调应变方程和应变一位移的关系以及边界条件，求得钻井引起的各向异性地层井周应力分量。远场地应力引起的各向异性地层井周应力分量与钻井引起的各向异性地层井周

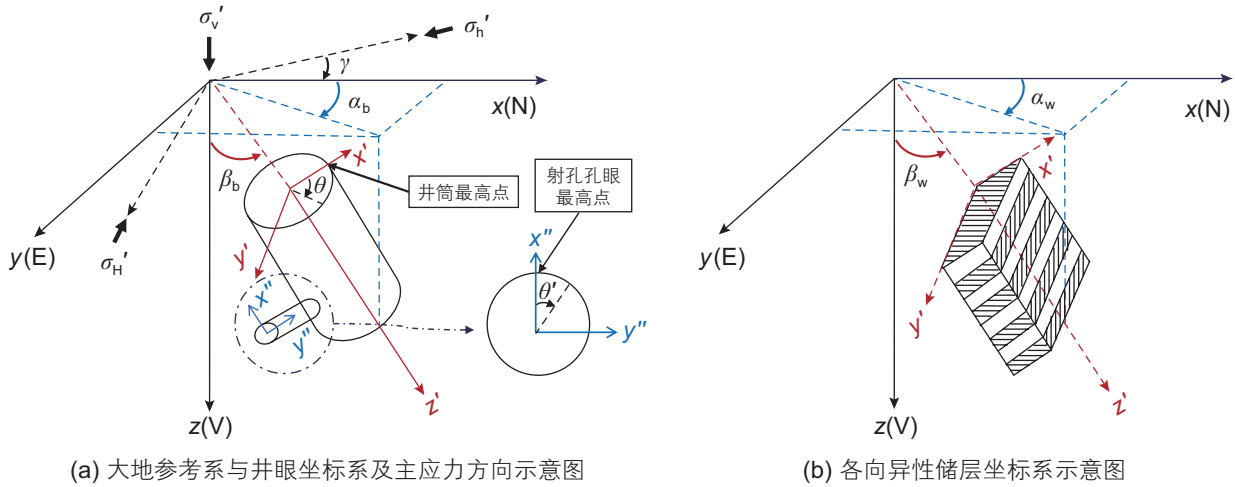


图2 坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate transformation systems

应力分量两部分相加构成各向异性地层井周总的有效应力分量(本文的计算基于有效应力)。

$$\begin{cases}
 \sigma_{xx} = \sigma_{xx,o} + \sigma_{xx,h} \\
 = \sigma_{xx,o} + 2R[\mu_1^2 \phi_1'(z_1) + \mu_2^2 \phi_2'(z_2) + \lambda_3 \mu_3^2 \phi_3'(z_3)] \\
 \sigma_{yy} = \sigma_{yy,o} + \sigma_{yy,h} \\
 = \sigma_{yy,o} + 2R(\phi_1'(z_1) + \phi_2'(z_2) + \lambda_3 \phi_3'(z_3)) \\
 \tau_{xy} = \tau_{xy,o} + \tau_{xy,h} \\
 = \tau_{xy,o} - 2R[\mu_1 \phi_1'(z_1) + \mu_2 \phi_2'(z_2) + \lambda_3 \mu_3 \phi_3'(z_3)] \\
 \tau_{xz} = \tau_{xz,o} + \tau_{xz,h} \\
 = \tau_{xz,o} + 2R[\mu_1 \phi_1'(z_1) + \lambda_2 \mu_2 \phi_2'(z_2) + \mu_3 \phi_3'(z_3)] \\
 \tau_{yz} = \tau_{yz,o} + \tau_{yz,h} \\
 = \tau_{yz,o} - 2R[\lambda_1 \phi_1'(z_1) + \lambda_2 \phi_2'(z_2) + \phi_3'(z_3)] \\
 \sigma_{zz} = \sigma_{zz,o} + \sigma_{zz,h} \\
 = -\frac{1}{a_{33}}[a_{31} \sigma_{xx,h} + a_{32} \sigma_{yy,h} + a_{34} \tau_{yz,h} + a_{35} \tau_{xz,h} + a_{36} \tau_{xy,h}]
 \end{cases} \quad (2)$$

其中: σ_h' 为最小水平主应力、 σ_H' 为最大水平主应力、 σ_v' 为垂向应力(有效应力), MPa; σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 为各向异性储层井周总应力分量正应力, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ 、 $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ 、 $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ 为切应力, MPa; $\sigma_{xx,o}$ 、 $\sigma_{yy,o}$ 、 $\sigma_{zz,o}$ 为远场地应力引起的各向异性地层井周应力分量的正应力, $\tau_{xy,o} = \tau_{yx,o}$ 、 $\tau_{xz,o} = \tau_{zx,o}$ 、 $\tau_{yz,o} = \tau_{zy,o}$ 为切应力, MPa; 所有应力均为有效应力。 γ 最小水平主应力与正北方向的夹角, °; α_b 为井筒方位角, °; α_w 为弱面方位角, °; β_b 为井斜角, °; β_w 为弱面倾斜角, °; θ 为井周角, °; θ' 为孔眼周角, °; μ_i 为应变协调方程对应的特征方程的特征根; ϕ_i 是以 z_i 为自变量的解析函

数, $z_j = x + \mu_j y$, x 、 y 为待求应力、应变的坐标; λ_i 为对应特征根的相关系数; R 为复数的实部。式中 $[a_{ij}]$ 为横观各向同性介质弹性系数矩阵。具体推导过程见 Amaide 等人的论文^[16, 37]。

考虑射孔孔眼与井筒的应力集中效应的叠加, 先将直角坐标系下的井周应力分量转换成柱坐标系下的应力分量(式 3), 再由式 4 求取射孔孔眼的任意周角 θ' 的受射孔孔眼应力集中效应影响的有效应力分量^[24, 33]:

$$\begin{cases}
 \sigma_r^w = \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \right) \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right) \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2} \right) \times \\
 \cos 2\theta + \tau_{xy} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} - \frac{4r_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + (p_w - p_p) \frac{r_w^2}{r^2} \\
 \sigma_\theta^w = \left(\frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \right) \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right) \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \times \\
 \cos 2\theta - \tau_{xy} \left(1 + \frac{3r_w^4}{r^4} \right) \sin 2\theta - (p_w - p_p) \frac{r_w^2}{r^2} \\
 \sigma_z^w = \sigma_{zz} - \nu_w \left[2(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) \frac{r_w^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \frac{r_w^2}{r^2} \sin 2\theta \right] \\
 \tau_{r\theta}^w = \left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2} \right) \left(1 - \frac{3r_w^4}{r^4} + \frac{2r_w^2}{r^2} \right) \\
 \sin 2\theta + \tau_{xy} \left(1 - \frac{3r_w^4}{r^4} + \frac{2r_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \\
 \tau_{\theta z}^w = (-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \left(1 + \frac{r_w^2}{r^2} \right) \\
 \tau_{rz}^w = (\tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta) \left(1 - \frac{r_w^2}{r^2} \right)
 \end{cases} \quad (3)$$

其中: p_w 为井底流压, MPa; p_p 为孔隙压力, MPa; r_w 为井筒半径、 r 为距井筒中心的距离, m。

$$\begin{cases} \sigma_r^p = p_w - p_p \\ \sigma_\theta^p = \sigma_z^w + \sigma_\theta^w - 2(\sigma_z^w - \sigma_\theta^w) \times \\ \quad \cos 2\theta' - 4\tau_{0z}^w \sin 2\theta' - (p_w - p_p) \\ \sigma_z^p = \sigma_r^w - \nu_v [2(\sigma_z^w - \sigma_\theta^w) \cos 2\theta' + 4\tau_{0z}^w \sin 2\theta'] \\ \tau_{r\theta}^p = 0 \\ \tau_{\theta z}^p = 2(-\tau_{rz}^w \sin \theta' + \tau_{r\theta}^w \cos \theta') \\ \tau_{rz}^p = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中： σ_r^p 、 σ_θ^p 、 σ_z^p 为射孔孔眼的径向应力、环向应力、轴向应力，MPa； $\tau_{r\theta}^p$ 、 $\tau_{\theta z}^p$ 、 τ_{rz}^p 为射孔孔眼的切应力，MPa。

2.2 水力裂缝起裂解析模型

水力裂缝起裂为岩石的拉伸破坏，当应力超过岩

石的抗拉强度时，会形成垂直缝(图 3c与 3d)或者水平缝(图 3e)。裂缝的起裂形态取决于射孔孔周的轴向应力与环向应力哪个先发生拉伸破坏。根据几何的简单性，如图 3a所示，垂直缝的起裂条件：射孔孔眼的环向应力大于等于岩石的抗拉强度且环向应力大于轴向应力， $\sigma_\theta^p \geq -T$ 且 $\sigma_\theta^p > \sigma_z^p$ ；如图 3b所示，水平缝的起裂条件：射孔孔眼的轴向应力大于等于岩石的抗拉强度且轴向应力大于环向应力， $\sigma_z^p \geq -T$ 且 $\sigma_z^p > \sigma_\theta^p$ 。

2.3 数值模拟验证

假设为裸眼完井与圆柱形射孔垂直相交。水平井沿最小水平主应力方向打井，井筒每隔 0.1 m射孔螺旋射孔，相位角 60°(如图 4所示)。井筒、射孔内的压力为 p_w 。根据表 2 的参数，逐渐增加 p_w ，对射孔完

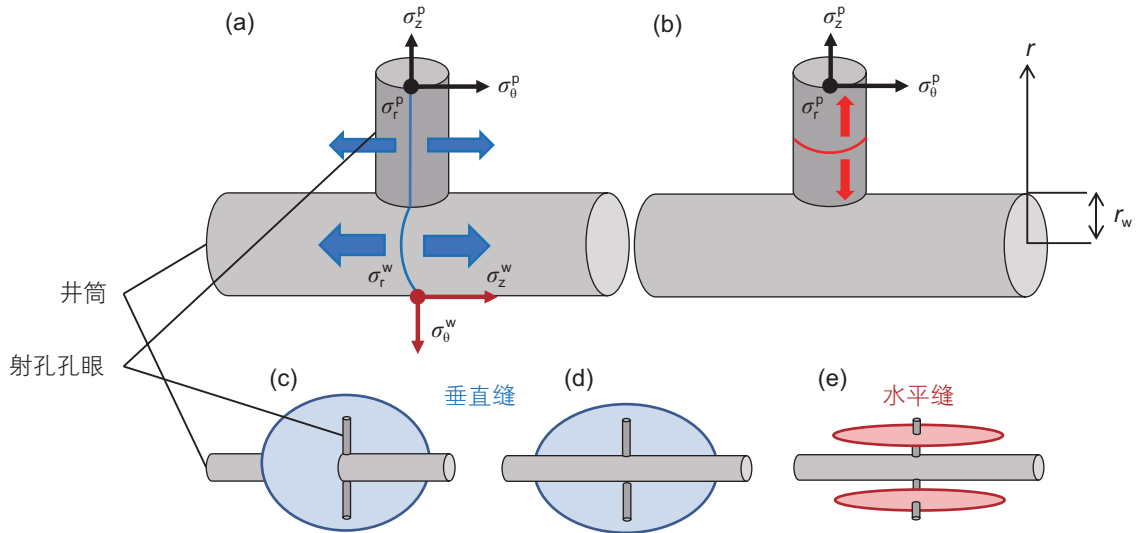


图 3 裂缝起裂形态示意图

Fig. 3 Fracture initiation morphology

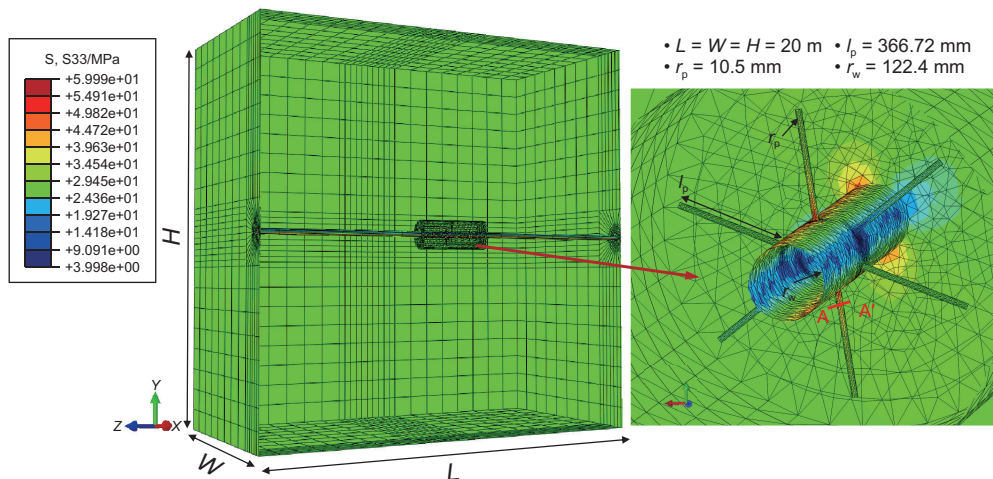


图 4 有限元数值模拟射孔应力与起裂压力

Fig. 4 Finite element numerical simulation of perforation stress and fracture pressure

表2 数值模拟输入的地质力学参数

Table 2 Geomechanical parameters for numerical simulation input

垂向应力 /MPa	最大水平应力 /MPa	最小水平应力 /MPa	孔隙压力 /MPa	垂向泊松比	横向泊松比	垂向杨氏模量 /GPa	横向杨氏模量 /GPa
57.39	65.42	46.30	29.07	0.3216	0.3362	47.87	43.29

井的应力场进行模拟分析。

图5为 $p_w=58$ MPa时,井周角为 170° 位置射孔(图4中A-A'截面),一倍井筒半径与一倍射孔半径处的两次应力集中应力分量(式4)的解析解与有限元数值模拟结果的比较。图6比较了三倍井筒半径与一倍射孔半径处,射孔孔周垂直裂缝的起裂压力的解析解与数值解。结果显示,平均误差为11.57%,这表明数值模拟对解析解的结果进行了有效验证。

3 射孔条件下原位应力场对产能的影响分析

由现场压裂施工曲线确定井口压力,根据公式:井底压力=井口压力+净水柱压力-沿程摩阻(液体在管柱中流动产生的阻力+射孔阻力),换算成井底压力 p_w 。对Y1、Y2进行分析,计算所需的力学参数(如表3)是通过声波、密度和伽玛测井数据,基于弹性波动理论推导出相应的理论计算公式,或依据前人的研究建立的经验公式进行解释,再通过实践和室内实验对这些测井解释得到的力学参数进行校正,最终确定各力学参数。

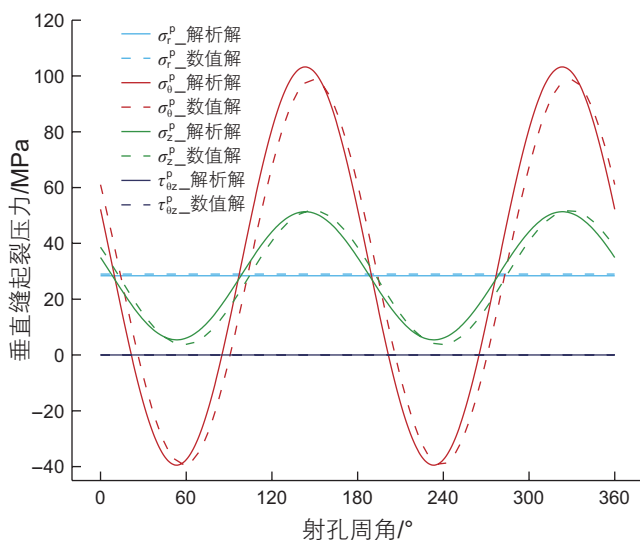


图5 一倍井筒半径、一倍射孔半径处的应力分量(有效应力)
Fig. 5 Stress components (effective stress) at one times the wellbore radius and one times the perforation radius

3.1 井周应力与射孔孔眼应力

(1) 一次应力集中的井周应力

以Y2井第14段,103簇的第一个孔为例(如图7所示),在一倍井筒半径到三倍井筒半径距离内,图7a为式(3)所计算的井周径向应力,应力范围为27.53~29.6 MPa;图7b为井周的环向应力,应力范围为21.76~35.83 MPa;图7c为井周的轴向应力,应力范围为20.72~25.24 MPa;图7d、e、f为井周的切应力。

(2) 两次应力集中的射孔孔周应力

以Y2井第14段,103簇的第一个孔为例(如图8所示),在一倍井筒半径到三倍井筒半径和一倍射孔孔眼半径到三倍射孔孔眼半径距离内,图8a为式4所计算的射孔孔周径向应力,应力范围为19.36~40.51 MPa;图8b为射孔孔周的环向应力,应力范围为-39.49~103.24 MPa;图8c为射孔孔周的轴向应力,应力范围为5.43~51.34 MPa;图8d、e、f为射孔孔周的切应力。

受井筒与射孔两次应力的影响,较一次应力集中

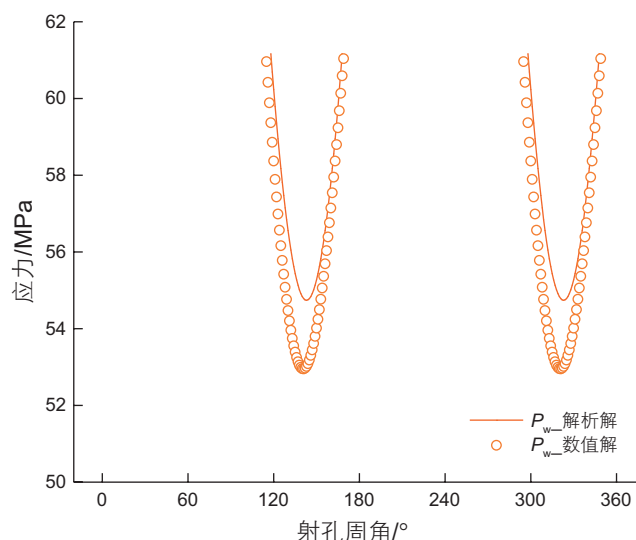


图6 三倍井筒半径、一倍射孔半径处垂直裂缝起裂压力
Fig. 6 The vertical fracture initiation pressure at three times the wellbore radius and at one times the perforation radius

表 3 Y1、Y2 井射孔参数与地质力学参数

Table 3 Perforation and geomechanical parameters of wells Y1 and Y2

参数	Y1	Y2
压裂段	第 8 段	第 14 段
射孔簇	第 19 簇	第 103 簇
射孔	第 1 个孔	第 1 个孔
测深/m	4629.00	2561.00
垂深/m	3499.16	2260.55
射孔角度/ $^{\circ}$	0.00	170.00
井方位角 α_b / $^{\circ}$	160.06	214.92
井斜角 β_b / $^{\circ}$	76.06	84.80
远场垂向有效应力 σ_v' /MPa	40.88	28.32
远场最大水平有效应力 σ_H' /MPa	36.73	36.35
远场最小水平有效应力 σ_h' /MPa	15.38	17.23
孔隙压力 p_p /MPa	43.82	29.07
静态垂向泊松比 ν_v	0.1600	0.3216
静态横向泊松比 ν_h	0.1548	0.3362
静态垂向杨氏模量 E_v /GPa	37.23	47.87
静态横向杨氏模量 E_h /GPa	44.81	43.29
岩石的抗拉强度 T /MPa	7.74	14.04
井底压力 p_w /MPa	91.20	57.47
总摩阻 f /MPa	13.09	17.28
2 井口起裂压力 p_{wh} /MPa	53.13	42.20
压裂液密度 ρ_{wi} /(g/cm 3)	1.465	1.465

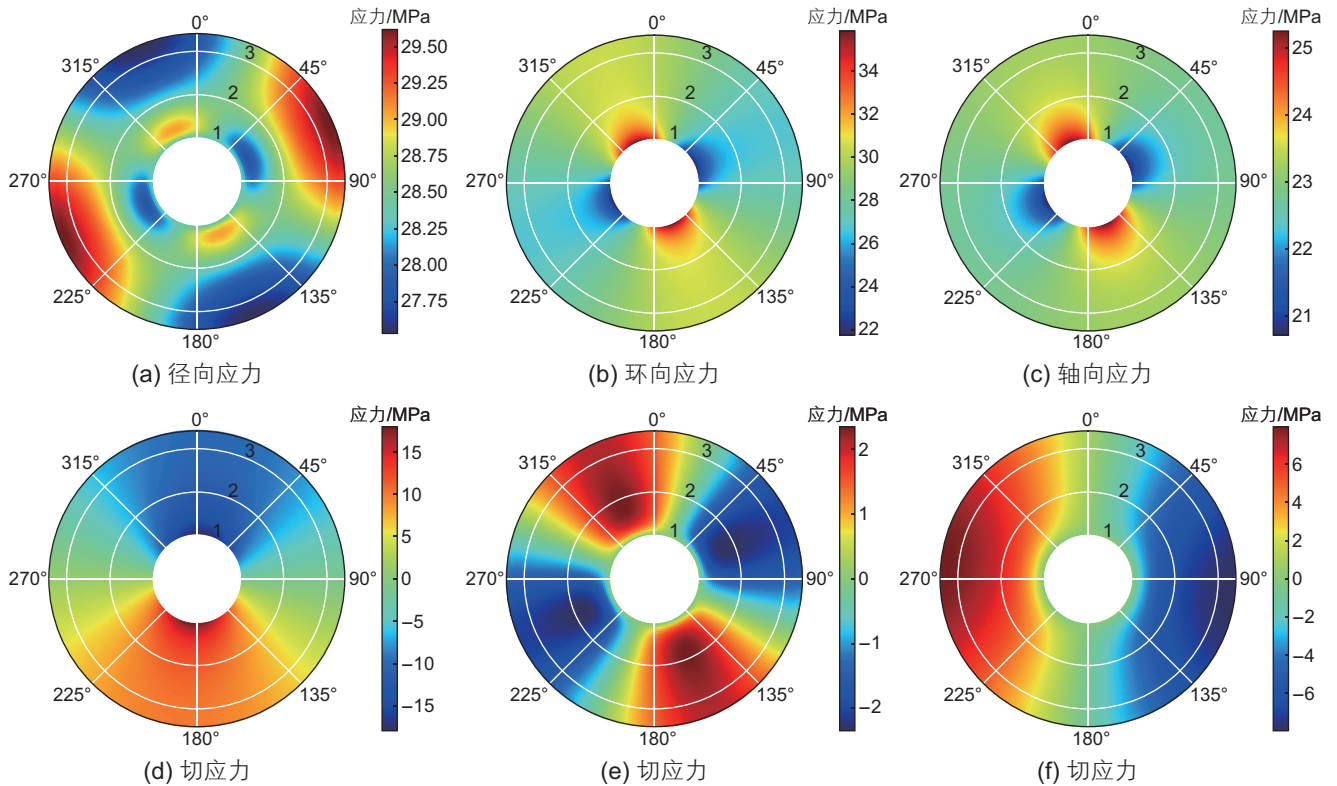


图 7 Y2 井一次应力集中后的井周应力

Fig. 7 Peri-well stresses after primary stress concentration in well Y2

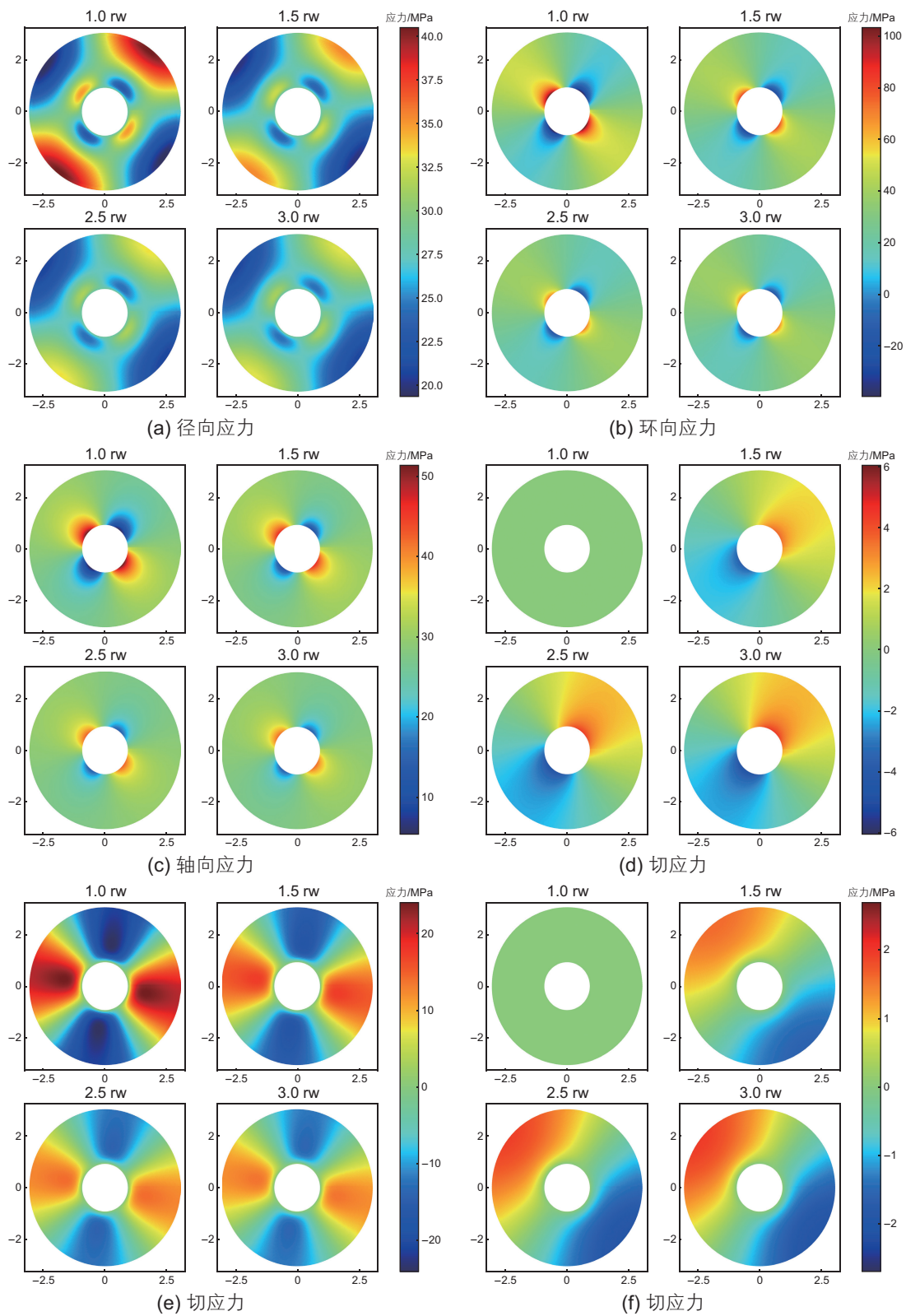


图 8 Y2 井二次应力集中后的射孔孔周应力

Fig. 8 Perforate stresses after secondary stress concentration in well Y2

的应力值, 各应力范围明显增大。在一倍井筒半径处的射孔孔周应力影响最大, 在 2.5 rw 到 3 rw 应力值趋于稳定, 两次应力集中效应基本消失。

3.2 射孔后水平主应力

Y1 井测深为 4629 m 处, 远场最大水平主应力(有

效应力)为 36.73 MPa, 最小水平主应力(有效应力)为: 15.38 MPa, 垂向应力(有效应力)为 40.88 MPa。射孔后(如图 9 所示), 在井底压力为 91.20 MPa 条件下, 最大水平主应力范围在 -45.65~45.65 MPa, 最小水平主应力范围在 -63.67~63.67 MPa。Y2 井测深 2561 m 处, 远场最大水平主应力(有效应力)为 36.36 MPa, 最小水平主应力(有效应力)为: 17.23 MPa, 垂向应力(有效应力)为 28.32 MPa。射孔后(如图 10 所示), 在井底压力为 57.47 MPa 条件下, 最大水平主应力范围在 -31.84~31.84 MPa, 最小水平主应力范围在 -25.35~25.35 MPa。

Y1 井第 8 段 19 簇的第一个射孔位置最大水平主应力增量值小于最小水平主应力, 射孔后局部应力状态由正断层偏走滑($Q=0.83$)变为逆断层($Q=-3.77$)且水平主应力发生反转。Y2 井第 14 段 103 簇的第一个射孔位置, 受两次应力集中效应影响, 最大水平主应力减小, 最小水平主应力增加但未超过最大水平主应力, 射孔后局部应力状态由走滑偏正断层($Q=1.72$)变

为走滑偏逆断层($Q=2.18$)。

3.3 裂缝起裂形态

如图 11 所示, 图 11a 为 Y1 井在测深为 4629 m 处, 图 11 为 Y2 井在测深为 2561 m 处, 1 rw 至 3 rw 两次应力集中后裂缝起裂形态。Y1 井射孔角度为 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° , 仅在 0° 与 180° 方位射孔, 射孔周角 $65^\circ\sim 99^\circ$ 与 $245^\circ\sim 279^\circ$ 范围内产生垂直缝, 其他射孔位置都为水平缝起裂。Y2 井射孔角度为 170° 、 230° 、 290° 、 350° 、 50° 、 110° , 垂直缝起裂范围占比 75% 以上, 且随 r 的增加无明显变化, 近井裂缝通道连通性较好。

在沿最小水平主应力方向布井且主要处于走滑偏正断层应力状态的 Y1 井中, 未产生气液的主要力学原因是井眼与射孔通道两次应力集中导致近井原位应力场的水平主应力反转, 应力状态变为逆断层, 抑制了垂直缝的起裂, 近井位置大量水平缝起裂, 裂缝迂曲度较大, 气液运移通道受阻。处于走滑偏正断层应

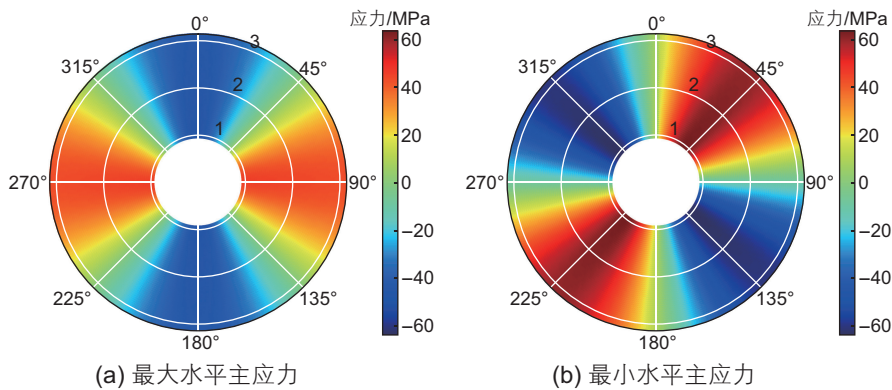


图 9 Y1 井射孔后孔周在 1~3 rw 范围内的水平主应力

Fig. 9 Principal horizontal stresses around perforation of Y1 well in the range of 1~3 rw

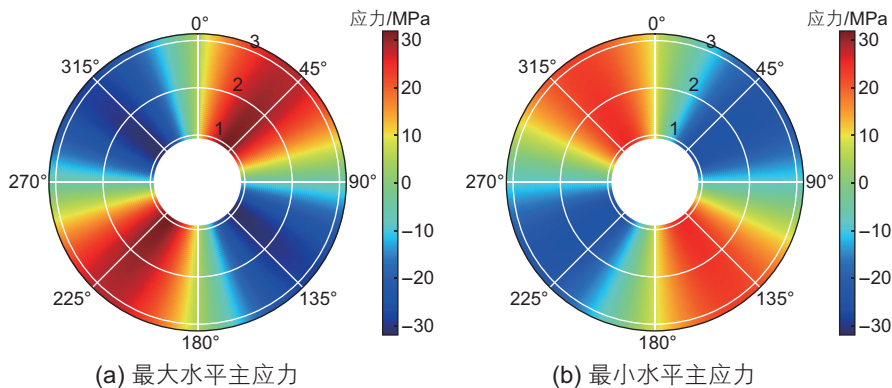


图 10 Y2 井射孔后孔周在 1~3 rw 范围内的水平主应力

Fig. 10 Principal horizontal stresses around perforation of Y2 well in the range of 1~3 rw

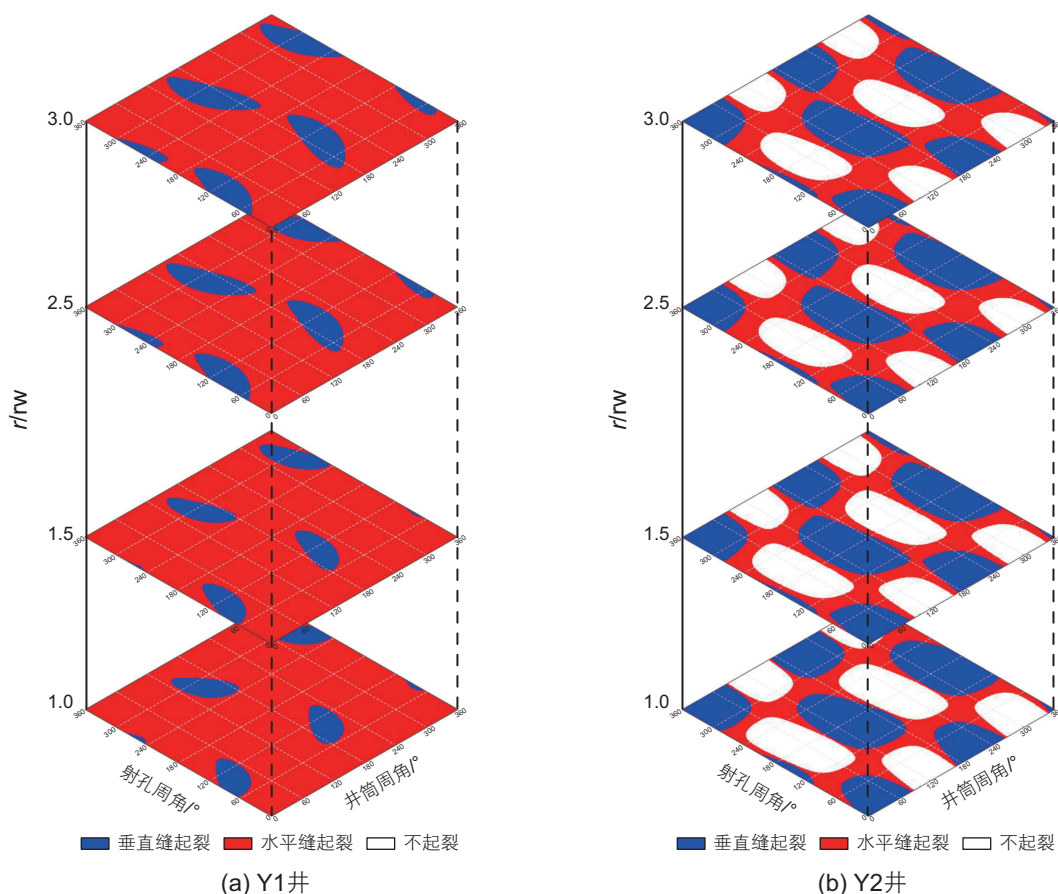


图 11 两次应力集中后 1~3 rw 范围内的裂缝起裂形态

Fig. 11 Fracture initiation patterns ranging from 1~3 rw after two stress concentrations

力状态的Y2井中，两次应力集后应力状态变为走滑偏逆断层，垂直缝起裂范围占比75%以上，近井裂缝通道连通性较好，有助于储层气液的运移。

4 结论

1) 鉴于非常规各向异性储层水力压裂射孔簇非均匀起裂的科学难题，本文考虑弱面各向异性、射孔孔眼与井筒两次应力集中效应的叠加，建立了任意定向井眼与射孔孔眼的应力模型与水力裂缝起裂压力的解析模型，研究了垂直缝与水平缝的起裂条件。

2) 射孔孔眼周围的应力分布对裂缝起裂压力有显著影响，进而影响井筒附近裂缝的几何形状。

3) 在沿最小水平主应力方向布井且主要处于走滑偏正断层应力状态的Y1井中，未产生气液的主要力学原因是井眼与射孔通道两次应力集中导致近井原位应力场的水平主应力反转，应力状态变为逆断层，抑制了垂直缝的起裂，气液运移通道受阻。处于走滑偏正断层应力状态的Y2井中，两次应力集后应力状态变为走滑偏逆断层，垂直缝起裂范围占比75%以上，近井裂缝通道连通性较好，有助于储层气液的运移。

4) 本研究可根据地应力条件、井眼与射孔位置，可预测裂缝起裂压力、位置及裂缝形态，对现场压裂射孔方案优化设计给予理论指导，为现场实际应用提供最小的起裂压力与最佳井筒—油藏连接通道的射孔方向。

参考文献

- [1] ZHONG C Y, LEUNG J Y. Numerical analysis of the effects of apparent-permeability modeling and secondary-fracture distribution for hydraulic-fractured shale-gas production analysis[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2020, 23(4): 1233–1250.
- [2] HOU B, CHANG Z, FU W N, et al. Fracture initiation and propagation in a deep shale gas reservoir subject to an alternating-fluid-injection hydraulic-fracturing treatment[J]. SPE Journal, 2019, 24(4): 1839–1855.

- [3] 时贤,程远方,常鑫,等.页岩气水平井段内多簇裂缝同步扩展模型建立与应用[J].石油钻采工艺,2018,40(2):247-252.[SHI X, CHENG Y F, CHANG X, et al. Establishment and application of the model for the synchronous propagation of multi-cluster fractures in the horizontal section of shale-gas horizontal well[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2018, 40(2): 247-252.]
- [4] 赵立强,刘飞,王佩珊,等.复杂水力裂缝网络延伸规律研究进展[J].石油与天然气地质,2014,35(4):562-569.[ZHAO L Q, LIU F, WANG P S, et al. A review of creation and propagation of complex hydraulic fracture network[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 562-569.]
- [5] 张建光,李湘萍,王传睿,等.页岩气藏水力压裂中应力-流压耦合效应及人工裂缝扩展规律[J].中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(6):96-105.[ZHANG J G, LI X P, WANG C R, et al. Numerical simulation of rock formation stress-fluid pressure coupling and development of artificial fractures during hydraulic fracturing of shale gas reservoirs[J]. Journal of China University of Petroleum, 2018, 42(6): 96-105.]
- [6] 张瑛堃,陈尚斌,李学元,等.页岩气储层水力压裂扩展有限元模拟方法及应用[J].天然气地球科学,2021,32(1):109-118.[ZHANG Y K, CHEN S B, LI X Y, et al. Hydraulic fracturing simulation technology of shale gas reservoir and application of extended finite element method[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(1): 109-118.]
- [7] 程远方,常鑫,孙元伟,等.基于断裂力学的页岩储层缝网延伸形态研究[J].天然气地球科学,2014,25(4):603-611.[CHENG Y F, CHANG X, SUN Y W, et al. Research on fracture network propagation pattern of shale reservoir based on fracture mechanics[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(4): 603-611.]
- [8] 郭天魁,张士诚,潘林华.页岩储层射孔水平井水力裂缝起裂数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(S1):2721-2731.[GUO T K, ZHANG S C, PAN L H. Numerical simulation study of hydraulic fracture initiation for perforation horizontal well in shale play[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 2721-2731.]
- [9] RAFIEPOUR S, ZHENG D Z, MISKA S, et al. Combined experimental and well log evaluation of anisotropic mechanical properties of shales: an application to wellbore stability in Bakken formation[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibiti, 2020.
- [10] AHMED A A, HAYFAA L S, NUHAD A, et al. Investigation of the rock strength anisotropy on the wellbore stability analysis[C]//53rd U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2019.
- [11] 贾利春.横观各向同性页岩动、静态有效应力系数试验研究[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S2):4130-4139.[JIA L C. Experimental investigation on dynamic and static Biot coefficients of transversely isotropic shale[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S2): 4130-4139.]
- [12] 桂俊川,马天寿,陈平.横观各向同性页岩岩石物理模型建立——以龙马溪组页岩为例[J].地球物理学报,2020,63(11):4188-4204.[GUI J C, MA T S, CHEN P. Rock physics modeling of transversely isotropic shale: an example of the Longmaxi formation in the Sichuan basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(11): 4188-4204.]
- [13] SUÁREZ-RIVERA R, GREEN S J, MCLENNAN J, et al. Effect of layered heterogeneity on fracture initiation in tight gas shales[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2006.
- [14] DO D P, TRAN N H, HOXHA D, et al. Assessment of the influence of hydraulic and mechanical anisotropy on the fracture initiation pressure in permeable rocks using a complex potential approach[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100: 108-123.
- [15] LEKHNITSKII S G, FERN P, BRANDSTATTER J J, et al. Theory of elasticity of an anisotropic elastic body[J]. Physics Today, 1964, 17(1): 84.
- [16] AMADEI B. Rock anisotropy and the theory of stress measurements [electronic resource][J]. Lecture Notes in Engineering, eds., Brebbia, C. A. and Orszag, S. A., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1983.
- [17] HENG S, ZHAO R T, LI X Z, et al. Shear mechanism of fracture initiation from a horizontal well in layered shale[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 88: 103843.
- [18] WANG C, WANG J G. Effect of heterogeneity and injection borehole location on hydraulic fracture initiation and propagation in shale gas reservoirs[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 96: 104311.
- [19] ZHU H Y, GUO J C, ZHAO X, et al. Hydraulic fracture initiation pressure of anisotropic shale gas reservoirs[J]. Geomechanics and Engineering, 2014, 7(4): 403-430.
- [20] ZHAO X, JU Y, YANG Y, et al. Impact of hydraulic perforation on fracture initiation and propagation in shale rocks[J]. Science China Technological Sciences, 2016, 59(5): 756-762.
- [21] LI Y M, LIU G H, LI J, et al. Improving fracture initiation predictions of a horizontal wellbore in laminated anisotropy shales[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 390-399.
- [22] ONG S H, ROEGIERS J C. Fracture initiation from inclined wellbores in anisotropic formations[J]. Journal of Petroleum Technology, 1996, 48(7): 612-619.
- [23] OLIVER G, KARPFINGER F, JOCKER J, et al. Comparison between analytical and 3D finite element solutions for borehole stresses in

- anisotropic elastic[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 51: 53–63.
- [24] KANFAR M F, CHEN Z, RAHMAN S S. Risk-controlled wellbore stability analysis in anisotropic formations[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 134: 214–222.
- [25] GAMERO D H, MOHSIN L, DESROCHES J, et al. Importance of borehole images and dipole sonic data for optimal stimulation in a tectonic compressive setting[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, 2017.
- [26] ROOSTAEI M, SHARBATIAN A, FATTAHPOUR V, et al. An analytical model for hydraulic fracture initiation in deviated wellbores[C]//53rd U. S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2019.
- [27] 侯振坤, 程汉列, 海金龙, 等. 页岩水力压裂裂缝起裂和扩展断裂力学模型[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(5): 99–107. [HOU Z K, CHENG H L, HAI J L, et al. Fracture mechanics model of the initiation and growth of hydraulic fissures during hydraulic fracturing of shale[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(5): 99–107.]
- [28] WATERS G, WENG X W. The impact of geomechanics and perforations on hydraulic fracture initiation and complexity in horizontal well completions[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2016.
- [29] 郭天魁, 张士诚, 刘卫来, 等. 页岩储层射孔水平井分段压裂的起裂压力[J]. *天然气工业*, 2013, 33(12): 87–93. [GUO T K, ZHANG S C, LIU W L, et al. Initiation pressure of multi-stage fracking for perforated horizontal wells of shale gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2013, 33(12): 87–93.]
- [30] MICHAEL A, GUPTA I. Analytical orientation criteria for drilling and completion-induced fracture initiation considering fluid infiltration from the wellbore[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 190: 107033.
- [31] MICHAEL A, OLSON J E, BALHOFF M T. Orientation prediction of fracture initiation from perforated horizontal wells: Application in shale reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 193: 107355.
- [32] HOSSAIN M M, RAHMAN M K, RAHMAN S S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2000, 27(3): 129–149.
- [33] WENG X, XU L, MAGBAGBEOLA O, et al. Analytical model for predicting fracture initiation pressure from a cased and perforated wellbore[C]//SPE International Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition, 2018.
- [34] WENG X W. Fracture initiation and propagation from deviated wellbores[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1993.
- [35] 段文刚, 吝文, 田继军, 等. 川南罗布向斜五峰组——龙马溪组页岩孔隙分形特征与主控因素[J]. *新疆石油地质*, 2022, 43(2): 153–159. [DUAN W G, LIN W, TIAN J J, et al. Fractal characteristics and main controlling factors of Wufeng-Longmaxi formation shale in Luobo syncline, Southern Sichuan basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(2): 153–159.]
- [36] 计玉冰, 郭冰如, 梅珏, 等. 四川盆地南缘昭通示范区罗布向斜志留系龙马溪组页岩储层裂缝建模[J]. *岩性油气藏*, 2024: 1–9. [JI Y B, GUO B R, MEI J, et al. Fracture modeling of shale reservoirs of Silurian Longmaxi Formation in Luobo syncline in Zhaotong National Shale Gas Demonstration Area, southern margin of Sichuan basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024: 1–9.]
- [37] 张卫东, 常龙, 高佳佳. 横观各向同性地层井壁应力分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(11): 243–250. [ZHANG W D, CHANG L, GAO J J. Stress analysis at the borehole wall in transverse isotropic formations[J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(11): 243–250.]

(编辑 杨雅露)

第一作者: 刘英君 (1995年—), 博士研究生, 从事非常规油气地质力学研究, liuyingjun0926@163.com。

通讯作者: 鲜成刚 (1971年—), 博士, 研究员, 从事地质工程一体化综合研究和应用研究, xianchenggang@cup.edu.cn。